第27卷 第5期 腐蚀科学与防护技术 Vol.27 No.5
2015年9月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY Sep. 2015

船用焊接B10铜镍环失效分析

马爱利 张亚明 姜胜利 郑玉贵
中国科学院金属研究所 沈阳 110016

摘要：采用化学成分、宏观形貌、金相组织、微观及能谱分析等方法，分析了某船舶海水管路中的B10铜镍环的腐蚀失效原因。结果表明，在该铜镍环的腐蚀坑底部、冲刷腐蚀区、冲蚀坑内以及腐蚀穿孔的减薄区，都普遍存在着"冰糖块"状的晶间腐蚀形貌；优先腐蚀的晶界形成一个回路，被包围的晶粒发生了明显的脱镍和溶解；表层腐蚀产物及冲刷腐蚀区暴露出的晶粒上都存在S。该B10铜镍环的腐蚀破坏过程是含硫介质中的晶间腐蚀、脱成分腐蚀和冲刷腐蚀综合作用的结果。

关键词：B10铜镍合金 失效分析 晶间腐蚀 脱成分腐蚀 冲刷腐蚀
中图分类号：TG172 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-6495(2015)05-0473-10

Failure Analysis of a Weld Ring of 90/10 Cupronickel for Marine Pipe Combination

MA Aili, ZHANG Yaming, JIANG Shengli, ZHENG Yugui

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: A weld ring with rim of 90/10 cupronickel for marine pipe combination was corroded after 3 years operation. The failure of the ring was analyzed by means of chemical composition analysis, visual examination, metallographic observation of the alloy, as well as characterization of corrosion morphology and corrosion product by SEM/EDS. Results showed that intergranular corrosion was prevalent on the bottom of corrosion pits, in the erosion-corrosion zones and in the thinned region around corrosion perforations. De-nickelification and dissolution occurred in grains which were surrounded by the preferentially attacked boundaries. It was supposed that selective dealloying and dissolution was related with the types of grain boundary and the grain orientations. Sulfide was detected on the surface of the corrosion product and on the facet of emerged grains on the erosion-corrosion zone. Therefore, the failure of the cupronickel ring was the result from the synergistic effect of intergranular corrosion, dealloying corrosion and erosion-corrosion in the sulfide-containing environment.

Key words: 90/10 cupronickel alloy, failure analysis, intergranular corrosion, dealloying corrosion, erosion corrosion

1 前言

海水管路系统作为船舶、海上采油平台、滨海电厂和海水淡化工厂等海洋装备和工程设施的重要工作单元，承担着换热、冷却、消防等重要功能。海水管路系统一般由泵、阀门、管线和热交换器等金属部件组成，由于长期输运海水作为冷却介质，海水管路系统用材料必然面临着海水腐蚀的严峻挑战。铜镍合金因其良好的耐海水腐蚀性能和优良的冷、热加工工艺性能而成为目前海水管路系统用材料的主力军[1,2]。

铜镍合金海水管路腐蚀失效的案例时有报道[3,4]。

定稿日期：2014-10-17
作者简介：马爱利，女，1985年生，博士
通讯作者：郑玉贵，E-mail：ygzheng@imr.ac.cn，研究方向为多相流(气-液-固)条件下材料的腐蚀、冲刷磨损和空蚀交互作用机制以及耐磨蚀材料和涂层开发
DOI：10.11903/1002.6495.2014.319

影响铜镍合金耐蚀性的因素可分为两类：(1) 环境因素，包括水污染物 (HS^- 离子[5])，高流速或/和紊流状态[6,7]，(2) 材料因素，例如合金元素偏析，微观组织不均匀，夹杂物，晶界缺陷等。受某造船厂委托，本文对一个用于船舶海水管路法兰连接的铜镍环失效件进行失效分析。该部件铜镍管路法兰连接处的铜镍环，外形类似船标CB/T51-2007，其一端与管子对焊接，另一端套入松套钢法兰，法兰连接其它管法兰或青铜阀门或滤器，其成型工艺是铸料挤压成型。

据现场工作人员反馈，该B10铜镍环所在的海水管路系统，有少量泥沙，流速大约是3~5 m/s，大部分工作于20~35 ℃，压力为 (4~6)×10^2 KPa。该B10铜镍环的服役寿命大约是3 a，比预期 (10 a) 短得多；它的腐蚀破坏，严重影响了设备的正常运行，导致船舶在航率降低和运营成本上升，甚至威胁整船的安全。

基于此，本文对该B10铜镍环进行了失效分析，明确其腐蚀破坏的形式，找出导致其腐蚀破坏的原因。

2 失效分析

2.1 化学成分

从失效的B10铜镍环的合金基体中用钻床钻下屑状样品，利用荧光光谱仪对其进行化学成分分析，并将化学分析的结果和ASTM标准对B10合金的成分要求[2]进行对比，见表1。可见，该失效部件的合金成分合格。

2.2 组织分析

从失效的铜镍环上沿横向和纵向切取金相样品，经研磨、抛光后，用配比为$FeCl_3$∶盐酸∶乙醇=5 g∶2 mL∶96 mL的蚀刻剂进行蚀刻，然后对其金相组织进行观察。图1a和b分别是该铜镍环的横向和纵向组织。可以看到，该铜镍环组织的晶粒度具有显著的不均匀性，在图1a的横向组织上，等轴细晶粒区被周围粗大的不完全再结晶组织包围；在图1b的纵向组织上，呈条带状分布的细晶粒区和粗晶粒区平行分布。以上组织特点说明该铜镍环的内部组织属于不完全再结晶组织。

2.3 宏观和低倍腐蚀形貌

2.3.1 *宏观观察* 失效铜镍环的凸缘端的外径是200 mm，与铜镍管焊接端的外径是150 mm，见图2。为了方便描述铜镍环上下左右不同部位的腐蚀形貌，现从其服役安装时的顶部按顺时针方向依次标注为“区域A”、“区域B”、“区域C”和“区域D”，分别对应于其服役安装时的上部、右部、下部和左部，如图2a所示。

图3是失效铜镍环不同部位的宏观腐蚀形貌。在“区域A”位置，即铜镍环的顶部，腐蚀形貌以点蚀坑为主，还分布着许多大而浅的腐蚀坑，坑内布满了疏松的绿色腐蚀产物；在“区域B”位置，即铜镍环的右侧，同时存在点蚀坑和冲刷腐蚀区，还有一个直径约13 mm的贯穿孔，孔边缘是明显的减薄区；在“区域C”位置，即铜镍环的底部，形成了大片的冲刷腐

表1 失效B10铜镍环的合金成分和ASTM标准对B10合金的成分要求

Table 1 Alloy compositions of the corroded 90/10 cupronickel ring and the specification in ASTM for the 90/10 cupronickel alloy

(mass fraction / %)

Material	Ni	Fe	Mn	C	Pb	S	P	Zn	Cu
Sample	10.6	1.61	0.86	0.013~0.018	0.002	0.001~0.003	0.005	0.009	Bal.
ASTM	9.0~11.0	1.0~1.8	≤1.0	≤0.05	≤0.02	≤0.02	≤0.02	≤0.5	Bal.

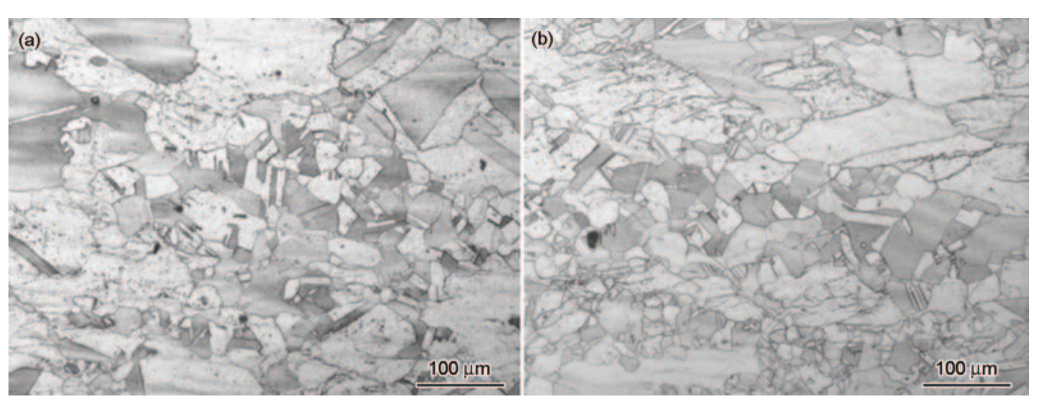


图1 失效的B10铜镍环的金相组织

Fig.1 Cross (a) and longitudinal (b) section metallography structure of the corroded welded-on 90/10 cupronickel ring

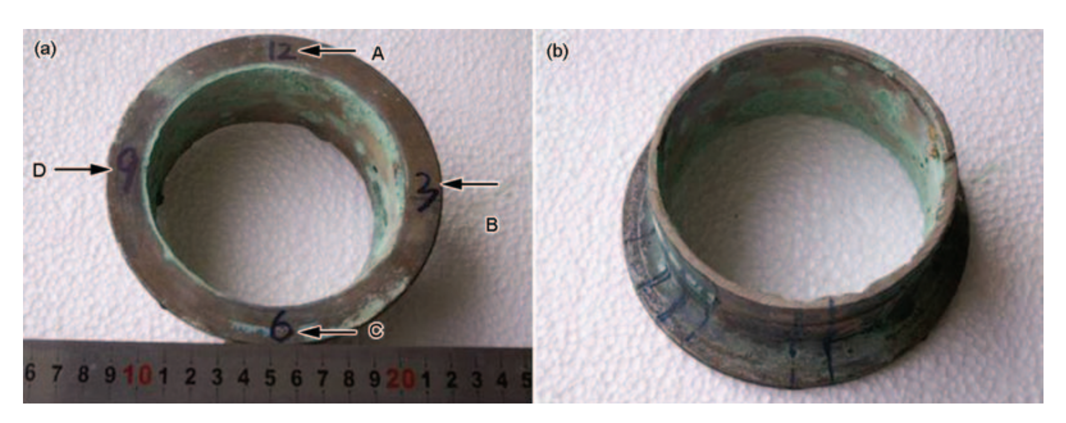


图2 失效的B10铜镍环的宏观形貌

Fig.2 Corroded welded-on 90/10 cupronickel ring with rim for marine pipe combination: (a) the front of the ring, (b) the back of the ring

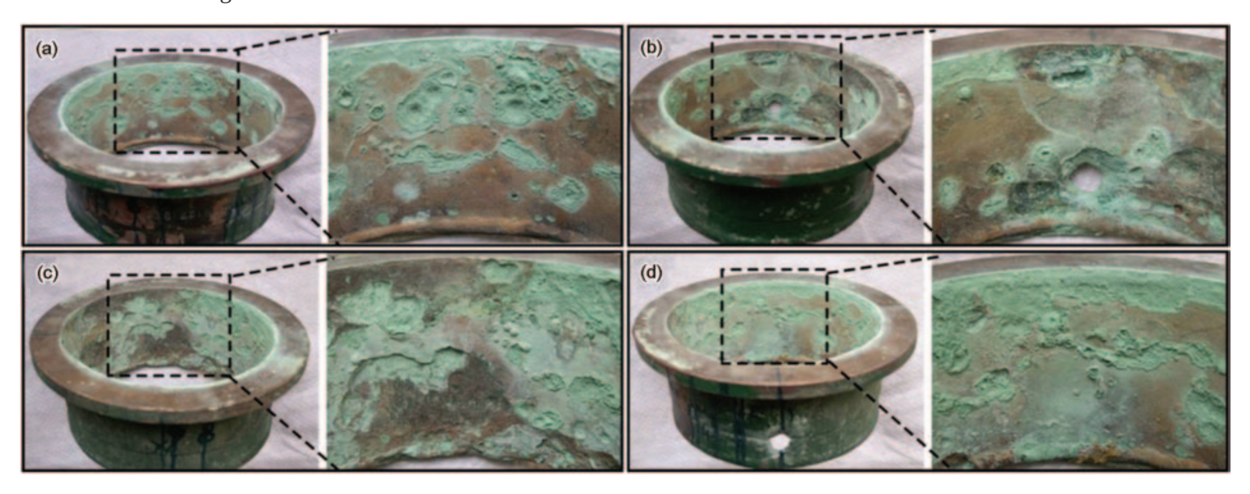


图3 失效的B10铜镍环不同部位的腐蚀破坏宏观形貌

Fig.3 Damaged areas of the corroded welded-on 90/10 cupronickel ring: (a) region A, (b) region B, (c) region C, (d) region D

蚀区，该区域内附着的腐蚀产物较少，其中还分布着许多冲蚀坑；在“区域D”位置，即铜镍环的左侧，铜镍环的内表面与“区域A”位置相似，附着了大量的绿色疏松腐蚀产物。这些绿色的腐蚀产物极易脱落，对脱落的腐蚀产物进行XRD分析，结果表明，这些绿色的腐蚀产物都是$Cu_2(OH)_3Cl$。

2.3.2 低倍腐蚀形貌　图4和5分别是失效铜镍环的“区域A”和“区域C”处的不同位置在体视镜下的腐蚀形貌。在图4中，“1”处形成了鼓包状的腐蚀产物；“2”处的腐蚀坑呈花瓣状；“3”处和“4”处坑内的腐蚀产物较少，可以看到坑底的合金基体；“5a”和“5b”分别是“5”处坑内的腐蚀产物去除前后的形貌，“5”处坑内腐蚀产物去除之后，坑底的合金基体发生了明显的腐蚀。

图5中的从“1”到“12”分别是图中黑色矩形框内从上到下不同位置的腐蚀形貌，其主要特征是，存在腐蚀产物被剥离的大片面积的冲刷腐蚀区 (见图5中的“1”处、“2”处、“8”到“12”处)，其内还分布着深浅不一的冲蚀坑 (见图5中的“10”到“12”处)，另外，还有许多大而浅的腐蚀坑，其表面被一层疏松的绿色腐蚀产物覆盖 (见图5中的“3”处、“6”处和“7”处)。

2.4 SEM/EDS分析

为了进一步弄清该失效铜镍环的腐蚀形貌、腐蚀类型、腐蚀产物及腐蚀原因，现从失效环上切取若干小块样品，在切割的时候保持其腐蚀原貌不受破坏，并对拟进行截面分析的试样进行封装、研磨和抛光，利用SEM/EDS技术对不同腐蚀区域的微观形貌和腐蚀产物成分进行分析。

2.4.1 表面腐蚀形貌和EDS分析　根据宏观特征，该铜镍环内表面的腐蚀区域可分为4类，即表面覆盖有绿色腐蚀产物的腐蚀坑、相对完整的表面、冲刷区的斜坡处和冲刷区内的冲蚀坑。图6是上述4类典型腐蚀区域的微观形貌，表2是图6中的微观腐蚀形貌上所标注的从A到J各位置的EDS分析结果。图6a是大而浅的腐蚀坑内的绿色疏松腐蚀产物，从表2的EDS结果可知，该腐蚀产物就是$Cu_2(OH)_3Cl$。图6b处表面被一层厚厚的腐蚀产物覆盖，表2的EDS结果显示，该处腐蚀产物膜显著富Fe

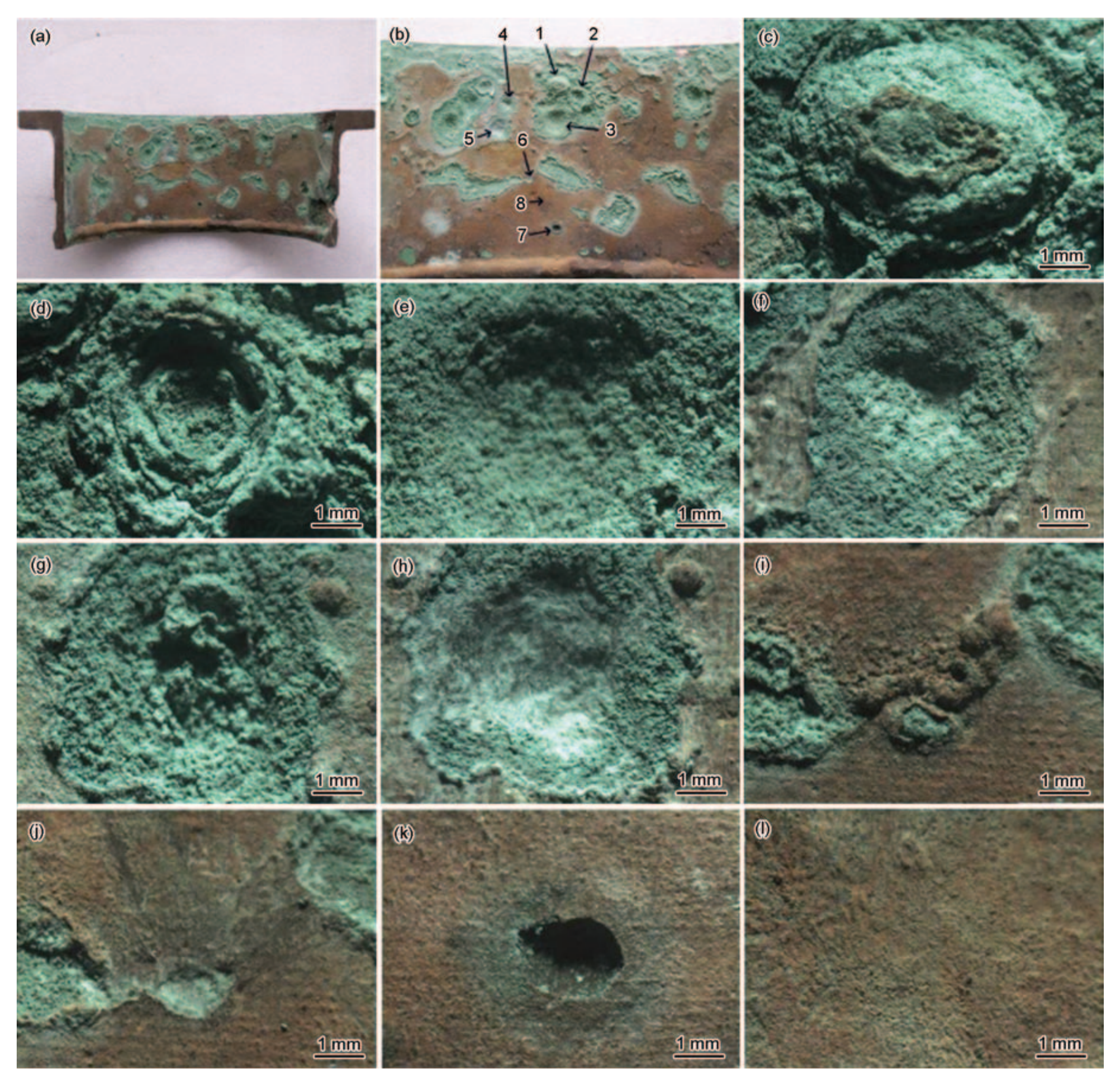


图4 失效的B10铜镍环的区域A内不同位置的低倍腐蚀形貌

Fig.4 Stereoscopic view of corrosion morphologies at different positions in region A of the corroded welded-on 90/10 cupro-nickel ring: (a) macro appearance of the corroded region, (b) macro morphology of region A, (c~l) morphologies at higher magnification of site 1~8 marked in Fig.4b

而贫Ni，并且在“B”处孔洞内S的含量接近10% (原子分数，%)。图6c是冲刷腐蚀区的微观形貌，该区域表现出典型的“冰糖块”状晶间腐蚀形貌，而且，表2中的EDS结果显示，“F”、“G”处裸露出的晶粒上严重贫Ni，“I”所指示的大晶粒之间的区域也贫Ni。图6d是冲刷腐蚀区内的冲蚀坑底部的微观腐蚀形貌，其晶间腐蚀的程度非常严重，表面残留的晶粒已经发生了严重的腐蚀破坏，“J”所指的冲蚀坑底部的晶粒已脱落。

图7a~c依次是“区域B”处腐蚀穿孔周围减薄区的微观形貌。从腐蚀孔边缘向内的腐蚀形貌呈沟壑起伏，而其中随处可见晶间腐蚀形貌，图中白色虚线框中标出的是其中几处典型的晶间腐蚀区域。可见，晶间腐蚀这一腐蚀现象在该失效铜镍环的主要腐蚀区域都普遍存在。

2.4.2 *截面腐蚀形貌和EDS分析* 图8是失效铜镍环内表面典型腐蚀区域的截面形貌，其中图8a是宏观腐蚀坑底部局部区域的微观形貌，图8b和c是图8a中局部区域的放大形貌。在某些晶粒脱落造成的凹坑底部，如图8a中的两个白色虚线矩形框中所示，腐蚀继续沿着某些晶界发展，导致这些晶界包围的晶粒发生了明显的腐蚀和溶解 (见图8b和c)。随着这些晶粒的腐蚀和溶解，与其相邻的晶粒会变得失去支撑，从而成为凸出的孤立晶粒，如图8b和c所示。在外界腐蚀介质特别是含砂介质的冲蚀作用下，这些凸出的孤立晶粒极易脱落。在图8d中，箭头所指示的三处凸出的晶粒，在最后一个有支撑的方向上的晶界也已经有腐蚀的迹象，在外界腐

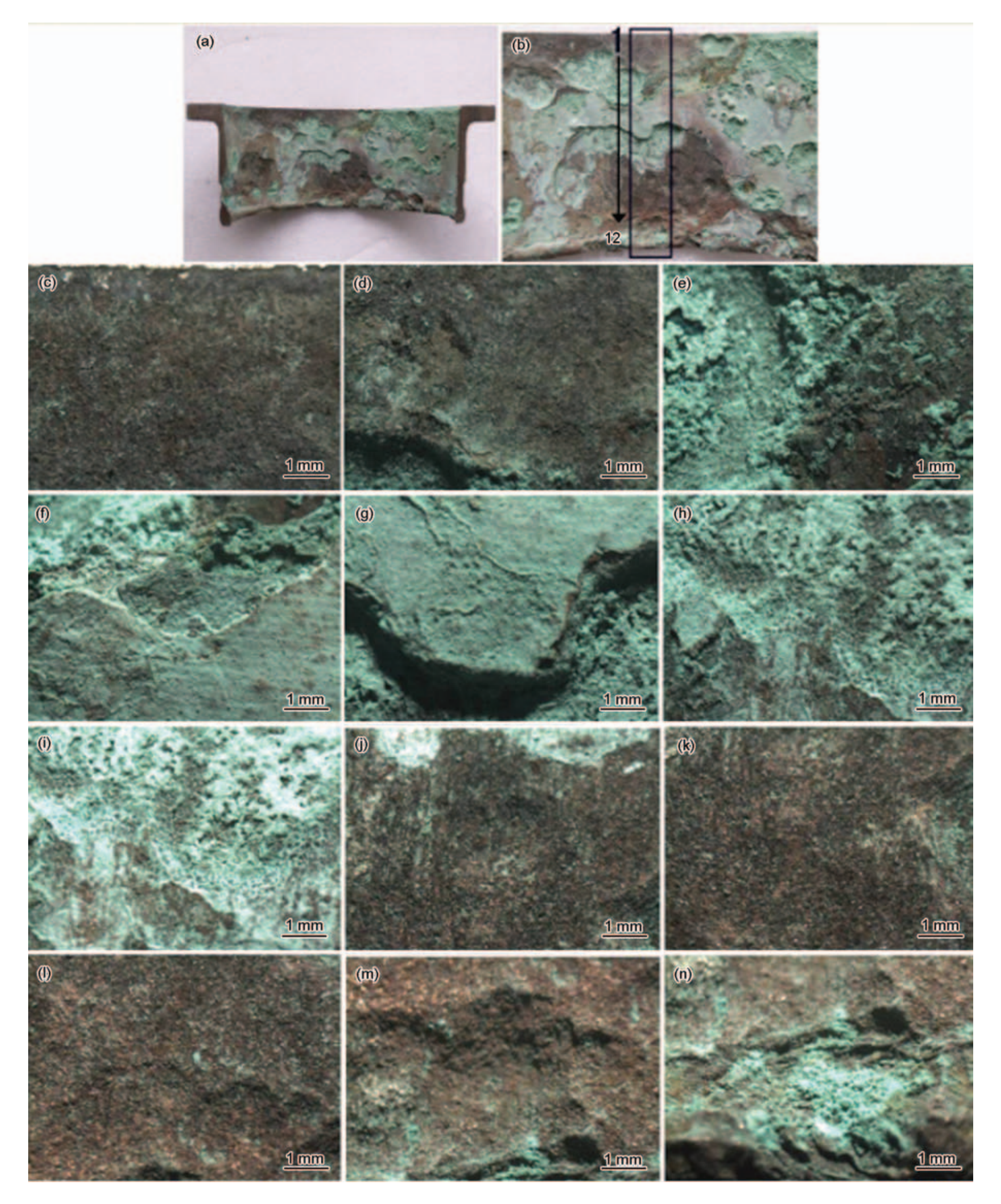


图5 失效的B10铜镍环的区域C内不同位置的低倍腐蚀形貌

Fig.5 Stereoscopic view of corrosion morphologies at different positions in region C of the corroded welded-on 90/10 cupronickel ring: (a) macro appearance of the corroded region, (b) macro morphology of region C, (c~n) morphologies at higher magnification of site 1~12 marked in Fig.5b

蚀介质的腐蚀和冲蚀作用下极易脱落。在图8c腐蚀坑的腐蚀产物中，还发现了未溶的合金块，EDS结果证明，其与基体合金成分一致，说明这个合金块来自合金基体脱落的晶粒。

在对图8中不同位置进行EDS成分分析的时候，发现腐蚀坑底部发生部分溶解的晶粒严重贫Ni和贫Fe，后又对其进行了EDS元素面扫描分析，也证明了这些部分溶解的晶粒发生了严重脱Ni和脱Fe，结果见图9。

3 讨论

上述失效分析结果表明，该铜镍环的过早失效，与含硫环境下的冲刷腐蚀、晶间腐蚀和脱成分腐蚀

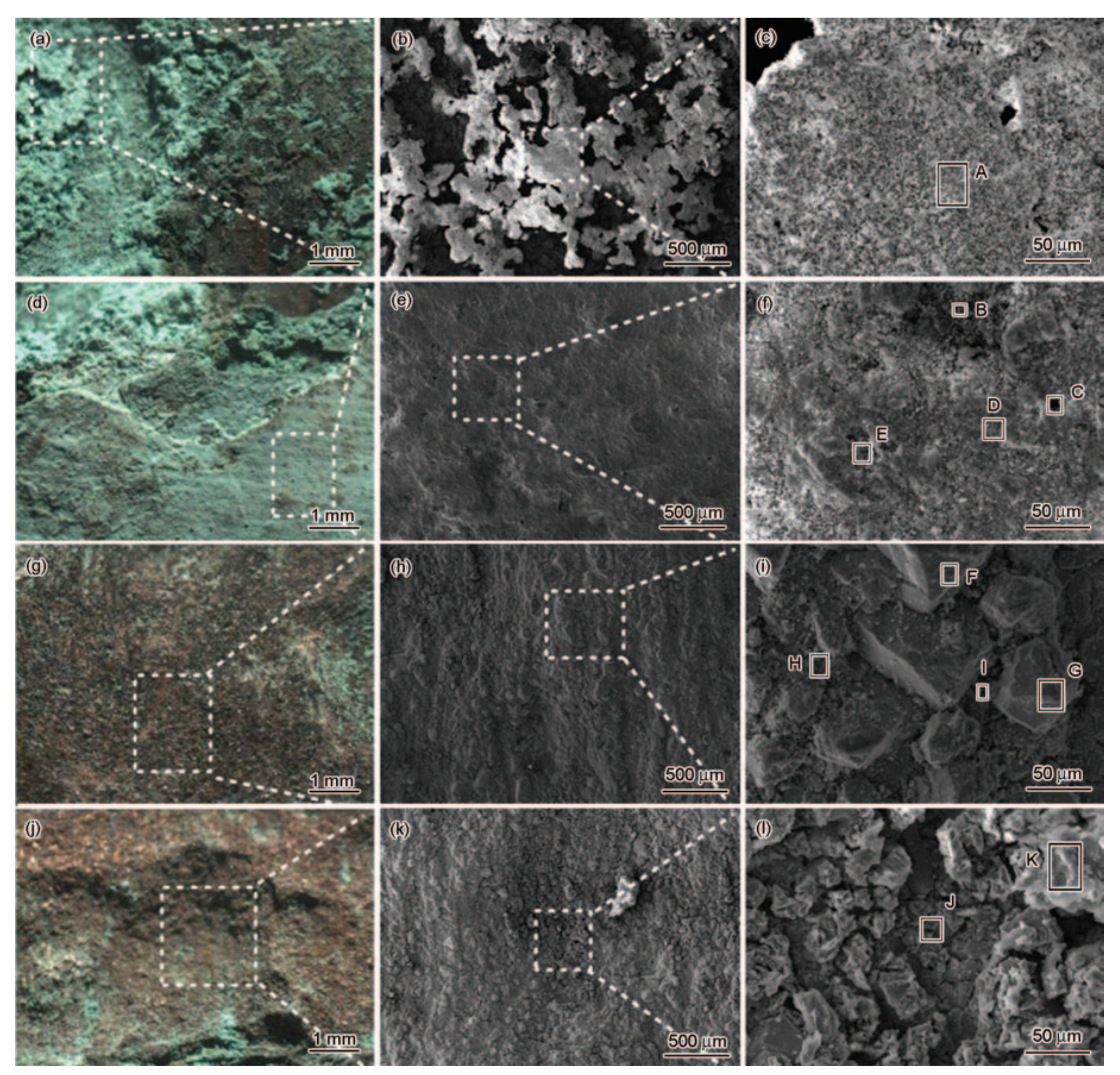


图6 失效的B10铜镍环内表面上典型腐蚀区域的微观形貌

Fig.6 Microstructures of typical damaged areas on the inner surface of the corroded welded-on 90/10 cupronickel ring: (a, d, g, j) macro morphologies; (b, e, h, k) SEM images; (c, f, i, l) SEM images at higher magnification

都有关。

3.1 晶间腐蚀

有研究结果显示[8]，B10合金的晶界特征分布对其耐蚀性有重要影响，不同类型晶界的腐蚀敏感性差异很大，Σ3晶界尤其是共格孪晶界的腐蚀敏感性比随机大角度晶界低。本文的失效分析表明，晶间腐蚀是该B10铜镍环腐蚀破坏的主要形式，在其腐蚀坑底部、冲刷腐蚀区、冲蚀坑内以及腐蚀穿孔的减薄区，都普遍存在着典型的晶间腐蚀形貌，即"冰糖块"状的腐蚀形貌。这说明，该B10铜镍环在服役环境条件下，其组织结构中的晶界是其发生腐蚀破坏的薄弱环节。但是，其晶间腐蚀发生的途径或机理还有待于进一步确认。

3.2 脱成分腐蚀

该B10铜镍环的截面腐蚀形貌并不是典型的晶间腐蚀的特点 (即腐蚀只沿着晶界向合金内部发展，晶粒内部并不发生腐蚀)，而是优先腐蚀的晶界形成一个回路，被包围的晶粒发生了明显的腐蚀溶解，EDS结果 (图9) 显示，这些被包围的晶粒发生了严重的脱合金成分，即脱Ni和脱Fe。

Mansfeld等[1]报道了B30合金在海水中的晶间腐蚀和脱合金成分腐蚀现象，并且发现，只有暴露于天然海水中的B30合金才发生脱合金成分腐蚀，暴露于人工海水的合金不发生脱合金成分腐蚀，由此推断，脱合金成分与海水中的微生物有关。栖居于铜镍合金表面闭塞区 (如沉积物或腐蚀产物等垢下) 的硫酸盐还原菌 (SRB) 的代谢活动会产生硫化物，而有文献报道[4]，S^{2-}可选择性地与晶界处的Ni发生反应，引起晶界的脱镍腐蚀和溶解，进而扩展到晶粒内部。为了验证硫化物对铜镍合金脱成分腐蚀的

表2 图6中所标注的从A到K所示区域的EDS分析结果

Table 2 EDS results corresponding to the marked sites from A to K on microstructures shown in Fig.6

(atomic fraction / %)

	Cu	Ni	Fe	O	Cl	Si	Al	S
A	25.97	---	---	58.00	16.03	---	---	---
B	28.65	0.60	7.49	38.84	12.60	1.01	1.01	9.79
C	24.30	0.49	6.59	55.26	13.36	---	---	---
D	17.58	---	9.82	57.62	12.29	0.99	0.97	0.73
E	19.11	0.52	10.86	56.95	11.90	---	---	0.66
F	59.14	---	2.93	29.00	8.93	---	---	---
G	44.17	---	1.04	46.64	8.16	---	---	---
H	33.28	4.21	3.53	48.17	10.11	---	---	0.70
I	66.69	2.64	1.67	26.27	2.72	---	---	---
J	47.70	4.60	13.76	31.14	2.80	---	---	---
K	5.78	2.05	19.84	67.34	3.82	---	---	1.17

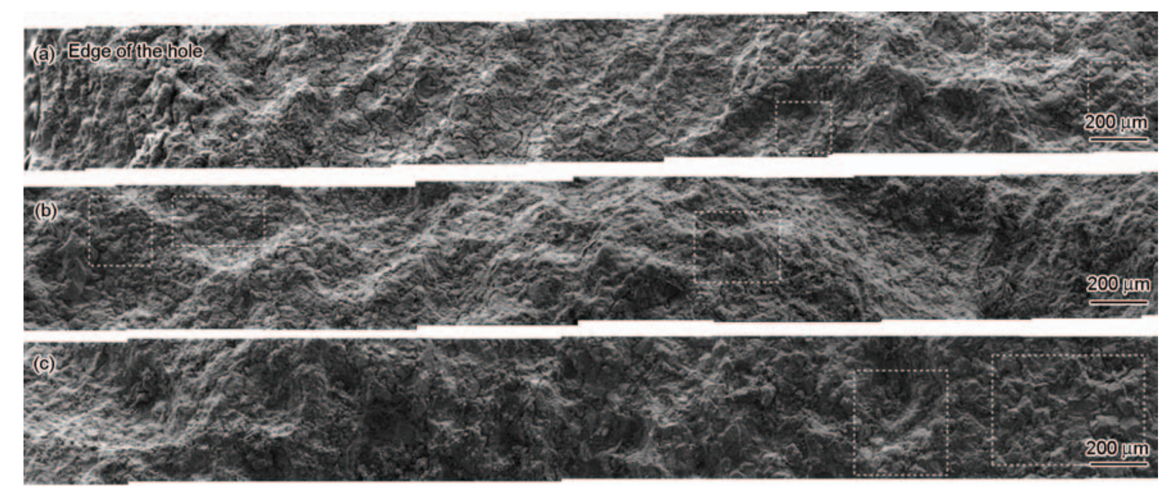


图7 腐蚀穿孔周围减薄区的腐蚀形貌

Fig.7 Morphologies of the thinned region around the corroded hole: (a~c) from edge of the hole to the inland of the thinned region

影响，Mansfeld等[1]研究了纯铜和纯镍在含Na_2S的人工海水中的极化曲线，结果发现，Na_2S的加入对纯铜的阳极溶解速率影响不大，但是却极大地提高了纯镍的阳极溶解速率。本文的EDS结果 (表2) 显示，在失效B10铜镍环内壁表面的孔洞里及冲刷腐蚀区暴露出的晶粒上都存在S。根据Mansfeld等[1]的研究结果可以认为，海水中的硫化物 (S^{2-}) 极大地加速了铜镍合金中Ni的选择性溶解；但是，硫引发该B10铜镍环的脱镍腐蚀的反应机理还有待于研究。

根据本文观察到的晶间腐蚀和晶粒的脱成分腐蚀现象，可以推测该B10铜镍环腐蚀失效过程中晶间腐蚀和脱成分腐蚀的作用关系，即脱镍腐蚀首先沿晶界进行，引起晶界的溶解，所以表现出晶间腐蚀形貌。这个过程可用图10的示意图表示。硫化物 (S^{2-}) 先以某些腐蚀敏感性较高的晶界 (如随机大角度晶界) 为切入点，引发该晶界的脱Ni，并进而引起晶界的溶解 (见图10a中的红色晶界)，因为脱Ni以后的铜镍合金即纯铜，对海水侵蚀的抵御能力极差；随着晶界被打通，大量Cl^-和S^{2-}沿晶界渗入，进而引起与晶界相邻的晶粒的脱Ni和溶解 (见图10a和b中的粉色晶粒)，结果正是我们在图8中所看到的现象。

值得注意的是，在优先溶解的晶界两侧的晶粒中，脱成分腐蚀的发生具有明显的选择性，只有一侧的晶粒发生了脱合金成分和溶解，另一侧的晶粒完好无损，成分与合金成分无差别 (见图8和9)。这说明，脱成分腐蚀不仅对晶界类型有选择性，有可能对

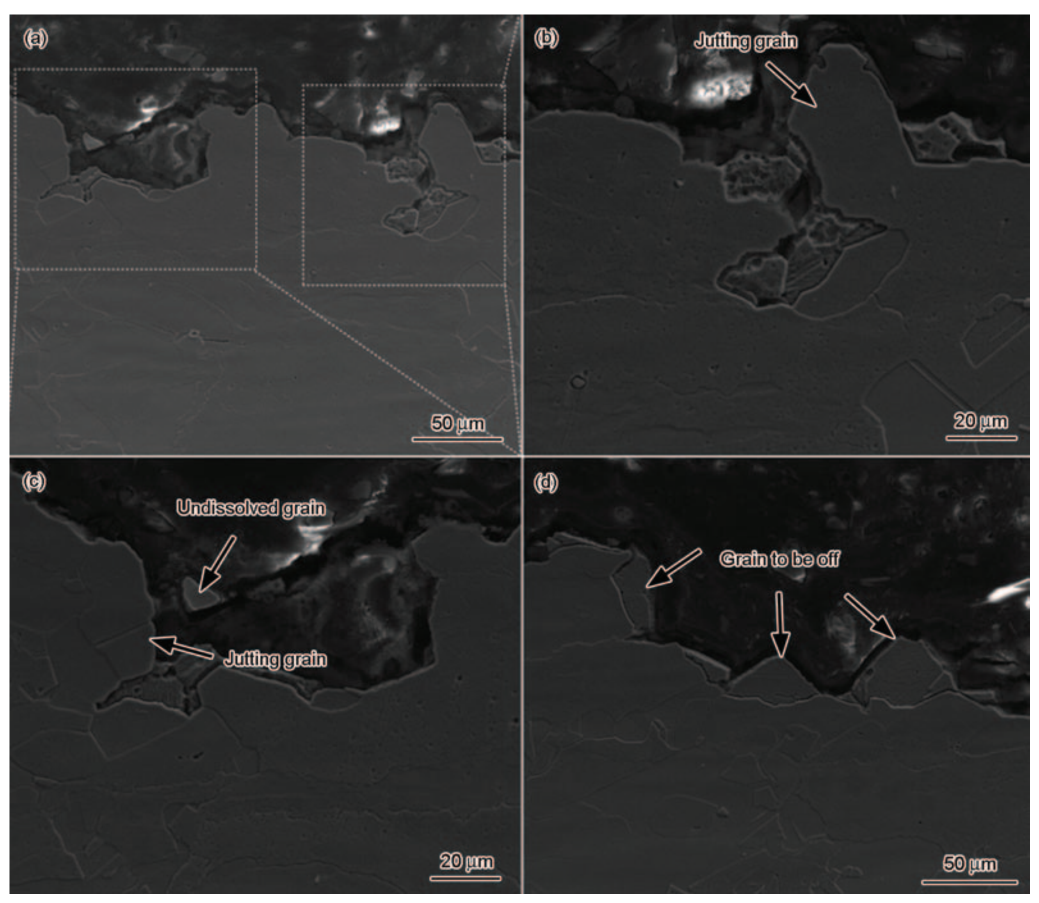


图8 失效的B10铜镍环内表面典型腐蚀区域的截面形貌

Fig.8 Cross-section microstructures of typical damaged areas on the inner surface of the corroded 90/10 cupronickel ring: (a, d) lower magnification, (b, c) higher magnification

晶粒的取向也具有选择性，只有处于某些不利取向的晶粒才能发生脱成分腐蚀，而处于有利取向的晶粒不发生脱成分腐蚀。而材料内部的晶界特征分布和晶粒的取向分布可由材料的加工过程进行调控。这也是晶界工程等领域研究的重点。

3.3 冲刷腐蚀

冲刷腐蚀是铜镍合金在海水中的最严重最普遍的腐蚀失效形式[2]。从该失效铜镍环的宏观形貌可以看出，在靠近下部的"区域C"处的内壁上存在大面积的冲刷腐蚀区，而"区域A"处的上部区域没有冲刷腐蚀的特征，只有附着了大量绿色腐蚀产物的腐蚀坑。这说明，该铜镍环所在的海水管路在服役过程中不总是处于满流量的工作状态，因此只有管道的下半部受到流动海水的持续冲刷，表现出了严重的冲刷腐蚀特征。

微观分析的结果显示，这些冲刷腐蚀区的腐蚀特征是晶间腐蚀；在截面分析结果中还发现了包裹在腐蚀产物中的未溶的基体合金块。据现场工作人员反馈，该B10铜镍环所在的海水管路系统，含有少量泥沙，流速大约是3~5 m/s。流动海水会对管内壁产生剪切力，有利于内壁表面疏松的腐蚀产物脱落，促进腐蚀的传质过程，有利于晶间腐蚀和脱成分腐蚀的进行；另一方面，晶间腐蚀和脱成分腐蚀引起的晶粒溶解使得一些处于有利取向的"耐蚀晶粒"成为失去支撑的孤立晶粒，在管内流动海水特别是含砂海水的冲刷和腐蚀的双重作用下，这些凸出的孤立晶粒也发生脱落。本文失效铜镍环的冲刷腐蚀过程，如图10的示意图所示，同时包括由晶间腐蚀和脱成分腐蚀造成的"易蚀晶粒"的溶解 (图10a和b)，以及由此造成的孤立的"耐蚀晶粒"的脱落 (图10c和d)。

3.4 S的作用

S是铜镍合金在海水中服役的"毒药"。一方面，S能阻碍铜合金表面保护性腐蚀产物膜的形成[9]。另一方面，许多文献报道过铜镍合金材料在含硫化物环境中的晶间腐蚀和断裂[1,3,4]，认为硫化物 (S^{2-}) 本身会造成铜镍合金在海水中的晶间腐蚀和脱镍腐蚀[4]。海水中硫化物的主要于海水中的污染物和硫酸盐还原菌的代谢产物。现场没有提供该失效铜镍环服役时所在的海水管路内介质的化学参数，但是，本文的失效分析显示，该失效铜镍环内壁表面的腐蚀产物中及冲刷区的晶粒上都含有硫化物，可以

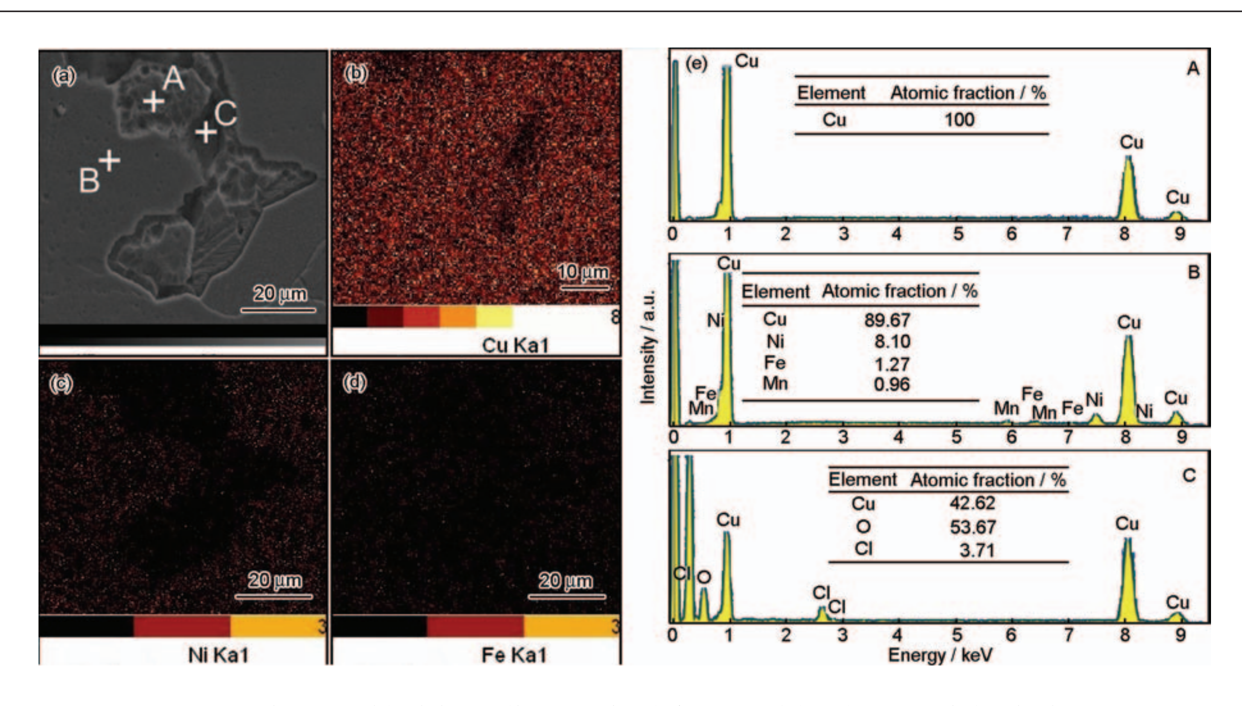


图9 图8b中局部区域的放大图及其EDS元素面扫描图和相应位置的EDS元素点分析结果

Fig.9 Magnified SEM image (a) and its EDS mapping (b~d) /point analysis (e) of the region in the white dashed rectangle in Fig.8b

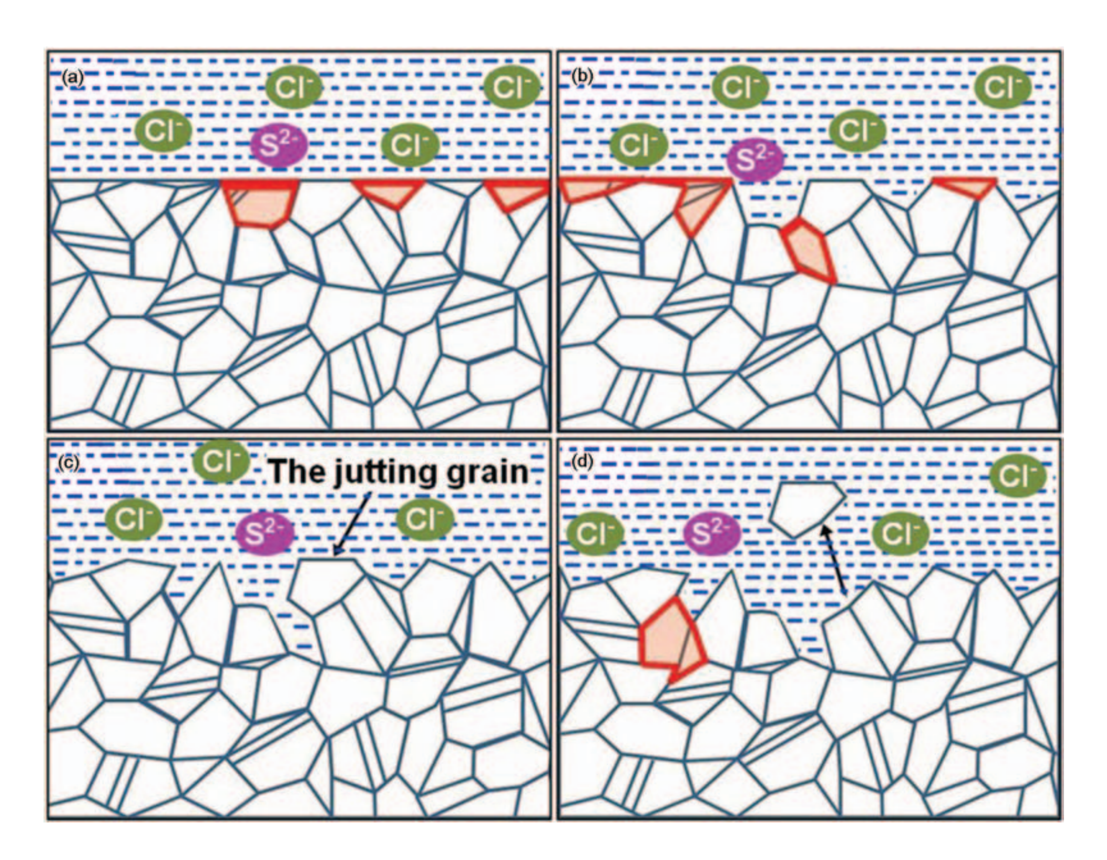
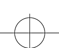


图10 B10铜镍环腐蚀破坏过程中晶间腐蚀、脱成分腐蚀和冲刷腐蚀的作用机制示意图

Fig.10 Schematic diagrams for corrosion process of the 90/10 cuponickel alloy ring: (a) grain dissolution takes place at some sites through intergranular corrosion and dealloying alloy, (b) process of grain dissolution continues, (c) dissolution of adjacent grains leaves some grains jutting out without support, (d) jutting grains are knocked off by the erosion-corrosion of the seawater, and meanwhile grain dissolution through intergranular corrosion and dealloying occurs at some other sites



肯定，这些硫化物在诱导、加剧该铜镍环的晶间腐蚀、脱成分腐蚀和冲刷腐蚀中起了重要作用。

4 结论

(1) 该失效B10铜镍环的合金成分合格。

(2) 晶间腐蚀是该B10铜镍环腐蚀破坏的主要形式，在其腐蚀坑底部、冲刷腐蚀区、冲蚀坑内以及腐蚀穿孔的减薄区，都普遍存在着典型的“冰糖块”状的晶间腐蚀形貌。这说明，在服役环境条件下该B10铜镍环组织结构中的晶界是其发生腐蚀破坏的薄弱环节。

(3) 优先腐蚀的晶界形成了回路，被包围的晶粒发生了严重的脱合金成分和溶解；冲刷腐蚀区暴露出的晶粒也严重贫镍。这说明，脱镍腐蚀首先沿晶界进行，引起晶界的溶解，进而扩展到晶内。

(4) 海水管路内的硫化物在诱导该铜镍环的晶间腐蚀、脱成分腐蚀和加剧其冲刷腐蚀破坏中起了重要作用。建议对该船舶海水管路系统进行水质化验，确定硫的来源，必要时对海水进行定期消毒处理。

参考文献

[1] Mansfeld F, Liu G, Xiao H, et al. The corrosion behavior of copper alloys, stainless steels and titanium in seawater [J]. Corros. Sci., 1994, 36(12): 2063

[2] Schleich W. Application of copper-nickel alloy UNS C70600 for seawater service [A]. CORROSION/2005 Annnual Conference and Exhibition [C]. Houston: NACE International, 2005

[3] Abraham G J, Kain V, Dey G K. MIC failure of cupronickel condenser tube in fresh water application [J]. Eng. Fail. Anal., 2009, 16 (3): 934

[4] Chandra K, Kain V, Dey G K, et al. Failure analysis of cupronickel evaporator tubes of a chilling plant [J]. Eng. Fail. Anal., 2010, 17 (2): 587

[5] Yuan S J, Choong A M F, Pehkonen S O. The influence of the marine aerobic Pseudomonas strain on the corrosion of 70/30 Cu-Ni alloy [J]. Corros. Sci., 2007, 49(12): 4352

[6] Efird K D. Effect of fluid dynamics on the corrosion of copper-base alloys in sea water [J]. Corrosion, 1977, 33(1): 3

[7] Wood R J K, Hutton S P, Schiffrin D J. Masstransfereffects of non-cavitating seawater on the corrosion of Cu and 70Cu-30Ni [J]. Corros. Sci., 1990, 30: 1177

[8] Ma A L, Jiang S L, Zheng Y G, et al. Correlation between microstructure and corrosion behavior of two 90Cu10Ni alloy tubes [J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2014, 27(4): 7308

[9] Yuan S J, Pehkonen S O. Surface characterization and corrosion behavior of 70/30 Cu-Ni alloy in pristine and sulfide-containing simulated seawater [J]. Corros. Sci., 2007, 49: 12769

